



ELSEVIER
ACADEMIC
PRESS

中国核学会系列科普丛书



宇宙能源 ——

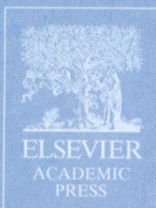
聚 变

[英] 加里·麦克拉肯 著
[英] 彼得·斯托特

核工业西南物理研究院 翻译组 译
核工业西南物理研究院 译审组 校



原子能出版社



中国核学会系列科普丛书



宇宙能源 ——

聚 变

[英] 加里·麦克拉肯 著

[英] 彼得·斯托特

核工业西南物理研究院 翻译组 译

核工业西南物理研究院 译审组 校



原子能出版社

图字：01-2007-4917

图书在版编目 (CIP) 数据

宇宙能源：聚变 / (英) 麦克拉肯, (英) 斯托特著; 核工业西南物理研究院翻译组译. —北京: 原子能出版社, 2008.1

(中国核学会系列科普丛书)

书名原文: Fusion: The Energy of the Universe

ISBN 978-7-5022-4032-5

I. 宇… II. ①麦…②斯…③核… III. 受控聚变—普及读物
IV. TL6-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 169467 号

内 容 简 介

本书以通俗的语言和表达形式介绍了受控热核聚变的整个发展进程, 包括从基础科学思想的产生到对太阳和恒星中聚变作用的理解; 解释了太阳中氢燃烧和恒星以及超新星中较重元素产生的过程; 论述了人类试图将太阳发生的核聚变反应用于地球能源而在磁约束与惯性约束方法及其他各种途径上为实现热核聚变所做的努力, 包括目前在众多探讨的实现核聚变的途径中最为看好的托卡马克研究的最新进展, 以及国际热核聚变实验堆 (ITER) 的进程和未来核聚变电站的建造。最后, 还从人类社会文明持续发展与世界能源需求的高度, 展望了聚变能发展的前景。

宇宙能源——聚变

出版发行 原子能出版社 (北京市海淀区阜成路 43 号 100037)

责任编辑 付 真

美术编辑 崔 彤

责任校对 冯莲凤

责任印制 丁怀兰

印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm × 1092 mm 1/16

字 数 200 千字

印 张 13.125

版 次 2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4032-5

印 数 1-2000 定 价: 48.00 元

版权所有 侵权必究 出版社网址: <http://www.aep.com.cn>

没有出版者的书面许可不得以任何方式或手段复制或传送本文的任何部分,不论电子的或机械的,包括照相、录音、任何信息储存和恢复系统。

要直接获得许可,请联系英国牛津爱思唯尔 (Elsevier) 科学和技术版权部: 电话: (+44)1865 843830, 传真: (+44) 1865 853333。E-mail: permissions@elsevier.com. uk. 你可以通过 Elsevier 的主页在线完成你的要求 (<http://Elsevier.com>), 选择 “customer support”, 然后选择 “obtaining Permissions”。

访问下面的网页可得到关于爱思唯尔科学出版物所有信息,
www.books.elsevier.com

本书组织翻译和承担翻译单位网页友情链接



中国核学会

中国核学会 www.ns.org.cn



核工业西南物理研究院 www.swip.ac.cn

对帕米拉 (Pamela) 和奥尔加 (Olga) 的鼓励和耐心表示谢意。

◆◆◆ 译 序

由中国核学会组织，核工业西南物理研究院的专家们翻译的《宇宙能源——聚变》是一本很好的核能科普读物。书中全面地介绍了聚变科学的基本概念、研究对象和方法及其对解决人类最终能源的重要意义；它适合对聚变科学有一定兴趣的普通读者和关注热核聚变研究的科技工作者等在内的广泛读者群，也可用作高校相关专业学生的补充读物。

核聚变科学研究以核聚变与等离子体物理科学为主，涵盖众多学科和技术领域。随着国际热核聚变实验堆(ITER:International Thermonuclear Experimental Reactor)计划的正式启动以及我国正式加入 ITER 计划，核聚变科学引起越来越多人的关注和兴趣。人们非常迫切需要一本以通俗易懂的形式介绍这门高深学科的科普读物。翻译出版这本书的目的就是为了满足人们的这一要求，使关心和从事聚变科学的科技人员、管理干部及政府相关部门通过阅读本书，能对聚变科学有一个较全面和较深入的了解，从而更好地理解为解决人类最终能源而进行的这项伟大事业。

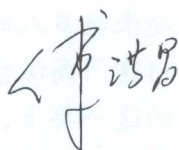
2007年5月28日，是我国著名的实验核物理学家、两弹元勋王淦昌先生诞辰100周年。王淦昌先生是世界激光惯性约束核聚变研究的奠基人之一，他生前十分支持和关注磁约束核聚变研究的发展。在他的倡导和推动下，经过几十年的努力，我国核聚变科学队伍不断壮大，国际合作与交流也在不断加强，实现了由原理探索到大型装置实验的跨越。选择现在出版这本书也是为了纪念王老献身科学的精神和对聚变研究的卓

越贡献。我想王老如果看到我们今天取得的成绩，看到我们已正式加入了国际热核聚变实验堆计划，成为世界核聚变研究大家庭的重要一员，也一定会感到欣慰。

核工业西南物理研究院是我国聚变能研发的重要力量，也是我国参与国际热核聚变实验堆研究计划的重要技术支撑单位之一。先后承担并完成国家“四五”重大科学工程项目“中国环流器一号（HL-1）装置研制”及“十五”“中国环流器二号A（HL-2A）装置工程建设项目”建设任务，实现了我国核聚变研究由原理探索到大规模装置实验的两次跨越发展，为我国核聚变能源开发事业作出了重要贡献。

在该书出版之际，特别要感谢核工业西南物理研究院潘传红院长、刘永副院长对本书翻译出版工作的大力支持和帮助；还要感谢参与本书翻译、审校工作的各位专家在该书的翻译和出版工作中所付出的辛勤劳动以及为普及和传播核聚变科学知识所作的贡献；最后，还要感谢该书作者加里·麦克拉肯（Garry McCracken）和彼得·斯托特（Peter Stott）同意翻译出版本书并专门为中译本撰写新的序言。

中国核学会
秘书长



2007年6月

◆◆◆ 自序

——为中译本而作

我们荣幸地收到中国核学会提出将本书翻译成中文的建议，并对核工业西南物理研究院的专家们为翻译本书所做的卓越工作表示感谢。中文版将是原英文版的第四种翻译本，其他三种译本分别为捷克语、日语和朝鲜语。

中国拥有50多年的聚变研究历史，这些研究包括磁约束聚变和惯性约束聚变两个主要的分支。从一开始中国就将聚变能的开发作为聚变研究的目标。在20世纪，中国的研究机构建成了多个中型托卡马克装置，例如HT-6B、HL-1、HT-7及HL-1M等，已具备了设计、建造、运行和研究这些托卡马克的能力和經驗。除了中国国内的这些工作外，许多聚变领域的学者被派往海外，在研究和工程方面与国外的研究机构开展广泛的合作。

2002年中国最大的具有偏滤器位形的托卡马克装置——中国环流器二号A（HL-2A）在位于成都的核工业西南物理研究院建成，并于2002年11月获得了初始等离子体。在此之后，许多新的诊断系统及大功率的加热系统得到了发展。2006年12月，该装置上等离子体电子温度已达到5千电子伏，等离子体电流达到430千安。此外，还开展了反应堆相关的研究及国际热核聚变实验堆（ITER）的一些项目，包括聚变材料、反应堆设计、实验包层模块、第一壁与屏蔽包层等研究。

中国自行设计的最大的超导托卡马克装置EAST建在合肥。该项目

于1996年提出并于1998年获得批准,从2003年至2005年进行装配,2006年3月完成建造,并于2006年9月28日在该装置上得到初始等离子体。2007年2月等离子体电流达到250千安,等离子体放电维持了5秒钟。

在惯性约束聚变领域,中国也取得了巨大进展。“神光”二号U (SGIIU) 激光器将于2007年期间运行运行,激光能量将达18千焦耳。计划2010年建成的“神光”三号 (SG-III) 激光器将具有64个激光束,波长为0.35毫米激光的总能量输出将超过150千焦耳。

自该书英文版发行后的短时间内,人们对世界能源供给状况的认识发生了引人注目的变化。特别是在中国和印度等发展中国家,能源的需求持续增长。人们正付出艰辛的努力以发展风能、生物燃料及其他形式的可再生能源,并且也在认真考虑开展新的裂变能计划。但是,即便所有这些成功了,能源的供应与需求之间仍存在不断扩大的缺口。显然,如果聚变能的开发能发展到商业生产阶段,它将为人类谋取极大的利益。

关于聚变研究的一些最新进展将在修订过的后记中描述。

加里·麦克拉肯
彼得·斯托特

2007年6月

◆◆◆ 原 序

聚变为星球提供动力并且从原理上能为地球提供几乎是无限的、清洁的、不污染环境的能源。已证实，利用聚变能源比预期具有更大的科学和技术挑战。尽管如此，早在20世纪70年代，俄罗斯伟大的物理学家列夫·阿奇莫维齐(Lev Andreevich Artsimovich)曾写道，“当人类需要时，热核聚变能就会准备好”。他说的看上去是正确的，而且那个时间正向我们靠近。因此，这本优秀论著的出版非常及时。

聚变能理论吸引人之处是显而易见的，聚变电站的燃料是水和锂，一台笔记本电脑电池中的锂和半缸水可产生200 000千瓦小时的电，相当于使用40吨煤所发的电。此外，聚变电站不会产生任何大气污染（温室气体、二氧化硫等），因此能满足日益增长的社会对环境的要求。

坐落在英国卡拉姆的欧洲联合环(JET)和坐落在美国普林斯顿的托卡马克聚变试验反应堆(TFTR)，已经产生超过10兆瓦的功率（虽然仅仅是几秒钟），表明可控聚变是实际可行的。下一步将建造一个电站规模的装置，这个装置被称为国际热核聚变实验堆(ITER)。它将产生500兆瓦功率，持续时间达到10分钟。它可以使人们确信建造聚变电站是可能的。聚变能的研发反映了全球的需要，在全球合作下建成ITER应该是指日可待的。

对建造聚变电站所用的材料进行试验也需要付出巨大的努力。它们应该是可靠的而且是经济的。假如材料的试验能和ITER同步推进，一个原

型聚变电站有可能在30年之内并网发电。本书描绘了这个令人兴奋的前景。

早在1920年,就有人提出聚变可能是恒星的能量来源。直到1938年具体的机制才被证实。在20世纪40年代,人们开始清楚地认识到原则上聚变能亦可在地球上被利用。但是早期乐观主义者很快意识到这就如同“像罪人希望不通过炼狱而能进入天堂是不可能的”(阿奇莫维齐1962年语)。这个技术难关涉及用确定的磁场位形来约束超过摄氏1亿度(相当于太阳中心温度的10倍)的气体而不使其接触到容器的器壁。解决这个具有挑战性的难题就像用带有弹性的带子去捆缚果酱一样,尽管花了很长的时间,但目前已经找到了解决这个难题的方式。

加里·麦克拉肯(Garry McCracken)和彼得·斯托特(Peter Stott)在聚变研究中有着卓越的成就。正当聚变在能源领域被视作一张具有潜力的王牌的观点日益被接受时,他们的书出现了。我坚信未来聚变能将提供有益于人类的足够的电能,问题是什么时候实现。这本重要的书描述了令人振奋的科学,令人着迷的历史和什么是人类寻求利用星球能源的关键。

克里斯·卢埃林·史密斯(Chris Llewellyn Smith)*

* 克里斯·卢埃林·史密斯教授(Professor Sir Chris Llewellyn Smith FRS)现任英国原子能管理局(UKAEA)卡拉姆部门主任、欧洲原子能共同体英国原子能委员会聚变协会会长、欧洲原子能共同体聚变顾问委员会主席。他曾任欧洲粒子物理研究所(CERN)主任(1994—1998年)。

前言

我们写这本书的目的是为了回答一些经常被提到的问题“什么是核聚变？”简单地说，核聚变是两个轻原子结合组成一个较重原子的过程。它与核裂变不同，核裂变是一个很重的原子分裂成两个或更多碎片。聚变和裂变都释放能量。也许因为词形相似，聚变和裂变有时被混淆。核裂变很出名，但实际上核聚变的存在更广泛，聚变不断地在整个宇宙中发生，它是太阳和恒星释放能量和从原始的氢中产生新元素的过程。这是非常值得关注的事实。

人类开展了相当多的研究工作，试图在地球上利用聚变产生能量。聚变将为人类提供无污染和无穷尽的能源。然而，为了释放聚变能，必须把产生聚变的燃料加热到令人难以置信的1亿摄氏度的高温，这实际上比太阳的温度还要高。问题是怎样容纳如此热的燃料，很明显，没有任何容器材料能承受如此高的温度。有两种可供选择的方法：第一种方法是用磁场形成一个绝缘层解决这个难题。经过50年艰苦的研究之后，这种被称为磁约束的方法现在处于可能建造原型发电站的阶段；第二种方法是快速压缩和加热燃料，在燃料膨胀之前使其燃烧和释放聚变能。这种被称为惯性约束的方法仍然处在其科学可行性需要验证的阶段。

这本书介绍了聚变的整个发展进程，包括从基础科学思想的产生到对太阳和恒星中聚变作用的理解。本书解释了太阳中氢燃烧和恒星以及超新星中较重元素产生的过程；详细讨论了在地球上利用磁约束和惯性

约束方法实现聚变能源的进展，包括从科学探索的开始到聚变电站的建造；简单解释了氢弹的原理并回顾了探索聚变过程中各种不成功的尝试；最后一章则从世界能源的需求讨论了聚变。

本书的编排结构适合广大的读者阅读。特别是我们希望它适合没有科学背景但对科学有兴趣的读者，也可以用作学生正式课本的补充教材。书的正文用最少的科学术语和方程式，并且尽可能用简单和直观的语言解释科学概念。另外，资料 and 更多专业的细节通过穿插在各章节中的附注给出，以帮助读者进一步认真理解一些基础物理知识，并且促进他们了解更进一步的文献。但是这些内容并不是必读部分，普通读者可跳过这部分内容，因为正文部分已经包含了理解聚变知识所有必需的内容。本书介绍了令人振奋的科学发现，并给出了一些对这些研究有贡献的著名科学家的画像。

加里·麦克拉肯
彼得·斯托特

2004年11月

◆◆◆ 致 谢

在撰写本书的过程中,我们利用了许多科技期刊和其他出版物中有关聚变的资料,以及很多未发表的内部资料和讨论稿。我们尽力试图准确、客观地阐述聚变研究的发展历程。聚变研究的发展反映了我们所探索的各种途径的相对重要性,弘扬了世界各国聚变研究机构为聚变研究做出的卓越贡献。不可避免,一些读者会认为对本书所阐述的部分论点、论题以及描述的贡献还有必要进行更详细的论述。

我们对在各方面给予我们帮助和建议的所有同仁表示感谢。我们尤其要感谢约翰·韦森(John Wesson)、吉姆·黑斯蒂(Jim Hastie)、布鲁斯·利普希茨(Bruce Lipschitz)、彼得·斯坦杰伯(Peter Stangeby)、斯宾塞·皮彻(Spencer Pitcher)和斯蒂芬·皮彻(Stephen Pitcher)。感谢他们花费大量的时间和精力审阅本书初稿,以及感谢他们对本书的改进提出了建设性的批评和宝贵的建议。我们还要感谢克里斯·卡彭特(Chris Carpenter)、杰斯·克里斯琴森(Jes Christiansen)、杰弗·科德(Geoff Cordey)、理查德·登迪(Richard Dendy)、约翰·劳逊(John Lawson)、拉蒙·利珀(Ramon Leeper)、永岭谦忠(Kanetada Nagamine)、彼得·诺里斯(Peter Norreys)、尼尔·泰勒(Neil Taylor)、弗里茨·瓦格纳(Fritz Wagner)、戴维·沃德(David Ward)、艾伦·伍顿(Alan Wootton)以及帮助我们审查书中的要点和细节,慷慨地提供图片和那些在其他方面给予我们帮助的同仁。特别感谢爱思唯尔学术出版社的杰里米·海赫斯特(Jeremy Hayhurst)、特罗依·利利

(Troy Lilly)及其同事,感谢他们给予我们的耐心指导和鼓励。

本书陈述的内容和表达的观点仅代表作者本人的观点,不代表欧委会或欧洲聚变计划的观点。

作者感谢以下这些机构和个人允许使用下面这些图片:欧洲聚变发展协会·欧洲联合环EFDA-JET(图1.2,2.5,3.8,4.4,4.5,4.6,4.8,5.2,5.4,9.2,9.3,9.8,10.1,10.3,10.5,10.6,10.7,10.8,11.1);英国原子能管理局(UKAEA)卡拉姆实验室(图5.3,5.6,5.7,5.8,11.2,11.5,12.3,以及图5.1,5.9,9.1,10.2中的编档保存照片);美国加利福尼亚大学劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(图7.6,7.7,7.8,7.9,7.10,和7.14);美国桑迪亚国家实验室(图7.12和7.13);德国伽兴马克斯·普朗克等离子体物理研究所(图9.6);美国普林斯顿等离子体物理实验室(图10.4);国际热核聚变实验堆ITER(图10.10);约翰·劳逊(John Lawson)(图4.7);国家医学图书馆(图1.1);伊夫林·爱因斯坦(Evelyn Einstein)(图2.1);英国皇家学会(图2.3);英国剑桥特里尼蒂大学的硕士研究生及研究员(图2.4);美国宇航局(NASA)图片(Solarviews.com)(图3.3);埃米里奥·塞格雷(P Emilio Segrè)档案馆(图3.4和图5.5);盎格鲁-澳大利亚观察站/大卫·马里(David Malin)(图3.6、3.7);由斯坦利A.布卢姆伯格(Stanley A. Blumberg)和路易斯G.派诺斯(Louid G. Panos)撰写,1990年斯科里布纳父子公司(Scribner's Sons)出版的《爱德华·泰勒》中的“泰勒家庭档案”(图6.1);全俄实验物理研究所(VNIIEF)博物馆与档案馆、美国物理学会(AIP)埃米里奥·塞格雷(Emilion Segrè)档案馆、《今日物理》汇集(图6.4);诺贝尔基金会(图7.5);图3.1最早出现在1910年由麦克米兰(Macmillan)撰写的*The Life of William Thomson*这本书中。这些资料的副本仍然保存在最初版权所有者的手里。

我们尽一切努力与所有的版权所有取得了联系。作者愿意将他们发现的一些错误或忽视的地方在将来的版本中给予弥补和纠正。

本书作者对原稿中的一些图进行了重新绘制或修改。这些图包括:图3.5(*Nucleosynthesis and Chemical Evolution of Galaxies*, B.E. J. Pagel, 1997年,英国剑桥大学出版社);图6.2[*Dark Sun: The making of the hydrogen bomb*, R. Rhodes, 1996年,美国纽约西蒙·舒斯特(Simon and Schuster)

出版社]; 图 7.1, 7.2, 7.11 [*Physics of Plasmas*, J. Lindl, 2(1995)3939]; 图 8.1 (*Too Hot to Handle: The story of the Race for Cold Fusion*, F. Close, 1990 年, 伦敦 W.H.Allen 出版社); 图 8.2 [J. Phys. G 29(2003)2043, K. Ishida 等人]; 图 9.4 (原图由美国通用原子能公司绘制); 图 9.5 [*L' Energie des Etoiles, La Fusion Nucleaire Controlee*, P-H Rebut, 1999 年, 巴黎奥迪勒·雅各布 (Odile Jacob) 出版社]; 图 12.1 [世界能源委员会报告: *Energy for Tomorrow's World: the realities, the real options and the agenda for achievement*, 1993 年, 纽约横圣马丁 (St. Martins) 出版社]; 图 12.2 [*Key World Energy Statistics*: 2003 版 (国际能源机构 IEA: 巴黎, 2004 年)]。我们还要特别感谢斯图尔特·莫里斯 (Stuart Morris) 及其同事特地为本书绘制或修改图片。

◆◆◆ 目 录

译序	I
自序——为中译本而作	III
原序	V
前言	VII
致谢	IX
第1章 什么是核聚变	1
1.1 炼金术士的梦想	1
1.2 太阳能	2
1.3 我们能够用聚变能吗	3
1.4 人造太阳	4
1.5 小结	5
第2章 质量转变成能量	6
2.1 爱因斯坦理论	6
2.2 元素的构成	7
2.3 质量亏损现象	11
第3章 太阳和恒星中的聚变	15
3.1 太阳能的来源	15
3.2 太阳炉	17
3.3 引力约束	19
3.4 较重原子的形成	22